

IMU Sensor Kalman Filter

한국공학대학교 메카트로닉스공학과
정 지 우

CONTENTS



- 01 개요
- 02 실험 환경
- 03 센서 데이터 분석
- 04 선형 칼만필터
- 05 캘리브레이션
- 06 결론

01 개요

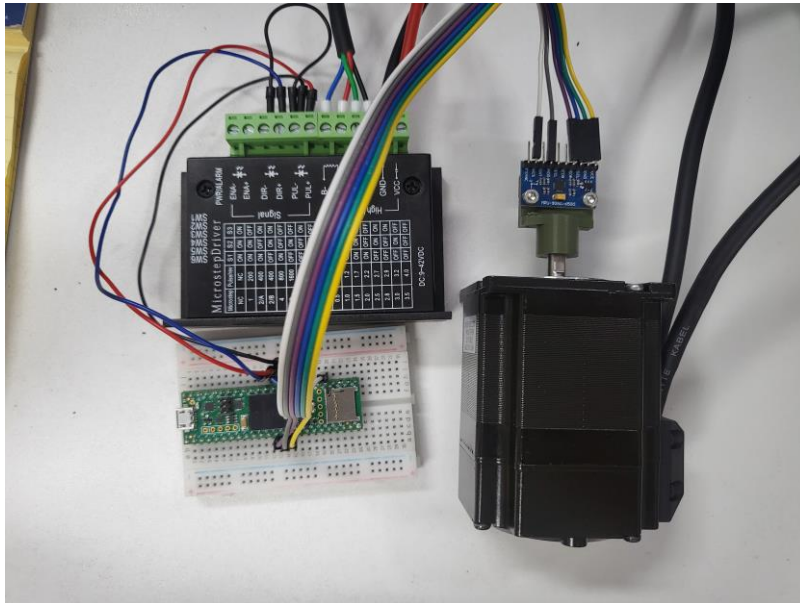
01 개요

재진 장비의 실제 변위값을 모니터링하기 위한
IMU센서를 활용한 오일러각 측정

02 실험환경

02 실험 환경

실험 구성



정지 상태와 0.0625Hz로 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 로 회전하는 경우 측정

센서의 y축 회전으로 실험 간소화

| Motor | Motor Driver | Sensor | MCU |
|-----------------------------------|-------------------------|---------|-----------|
| StepMotor 23H255- 052ED2500 | MSD-224 32분주 0.5A | MPU9250 | Teensy4.1 |

02 실험 환경

| IMU Sensor | | |
|---------------|------------------------------------|-----------|
| MPU9250 | | |
| Accelerometer | Scale | $\pm 8G$ |
| | Low pass filter | 188Hz |
| | Output data rate | 4000Hz |
| | Initial Tolerance | $\pm 3\%$ |
| Gyroscope | Scale | 500DPS |
| | Low pass filter | 188Hz |
| | Output data rate | 8000Hz |
| | Sensitivity scale factor tolerance | $\pm 3\%$ |

| MCU | |
|---------------------|---------------------|
| Teensy4.1 | |
| Framework | Arduino |
| Clock | 600MHz |
| Communicate MPU9250 | SPI(1M Hz), 4000Hz |
| Communicate PC | USB(250KHz), 4000Hz |

| PC | |
|-------------------|--------|
| Python 3.10.9 | |
| FFT Min Frequency | 1Hz |
| FFT Max Frequency | 2000Hz |

03 센서 데이터 분석

03 센서 데이터 분석

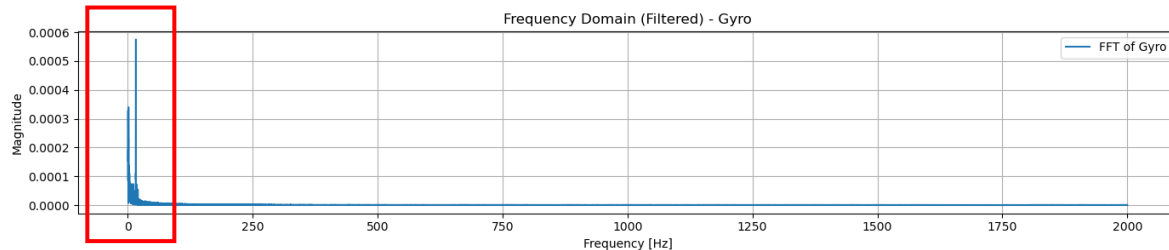
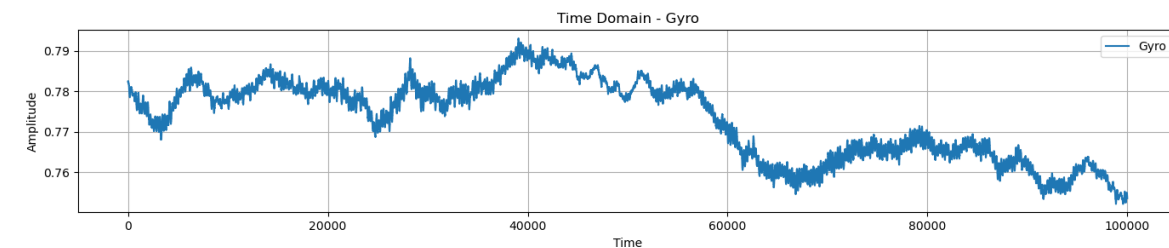
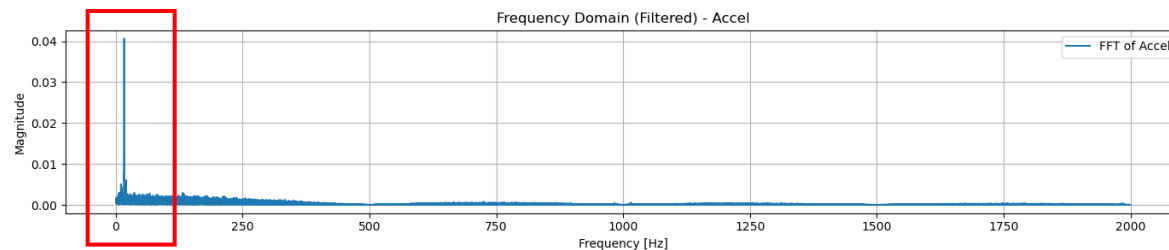
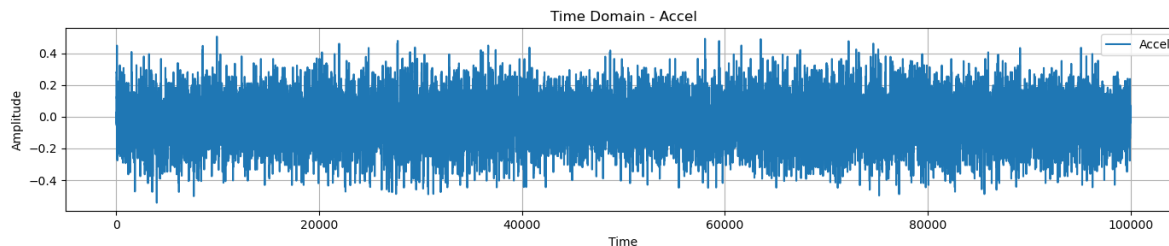
모터 정지 상태에서의 Gyro Roll 각도

$$Roll_{Acc} = \arctan\left(\frac{Acc_x - offset_{Acc_x}}{\sqrt{(Acc_y - offset_{Acc_y})^2 + (Acc_z - offset_{Acc_z})^2}}\right)$$

$$Roll_{Gyro}^k = Roll_{Gyro}^{k-1} + (Gyro_x - offset_{Gyro_x}) dt$$

가속도 센서는 모든 주파수 대역에서 자이로 센서에 비해 노이즈가 큼

센서의 데이터가 평균 -0.035134로 0에 근접함



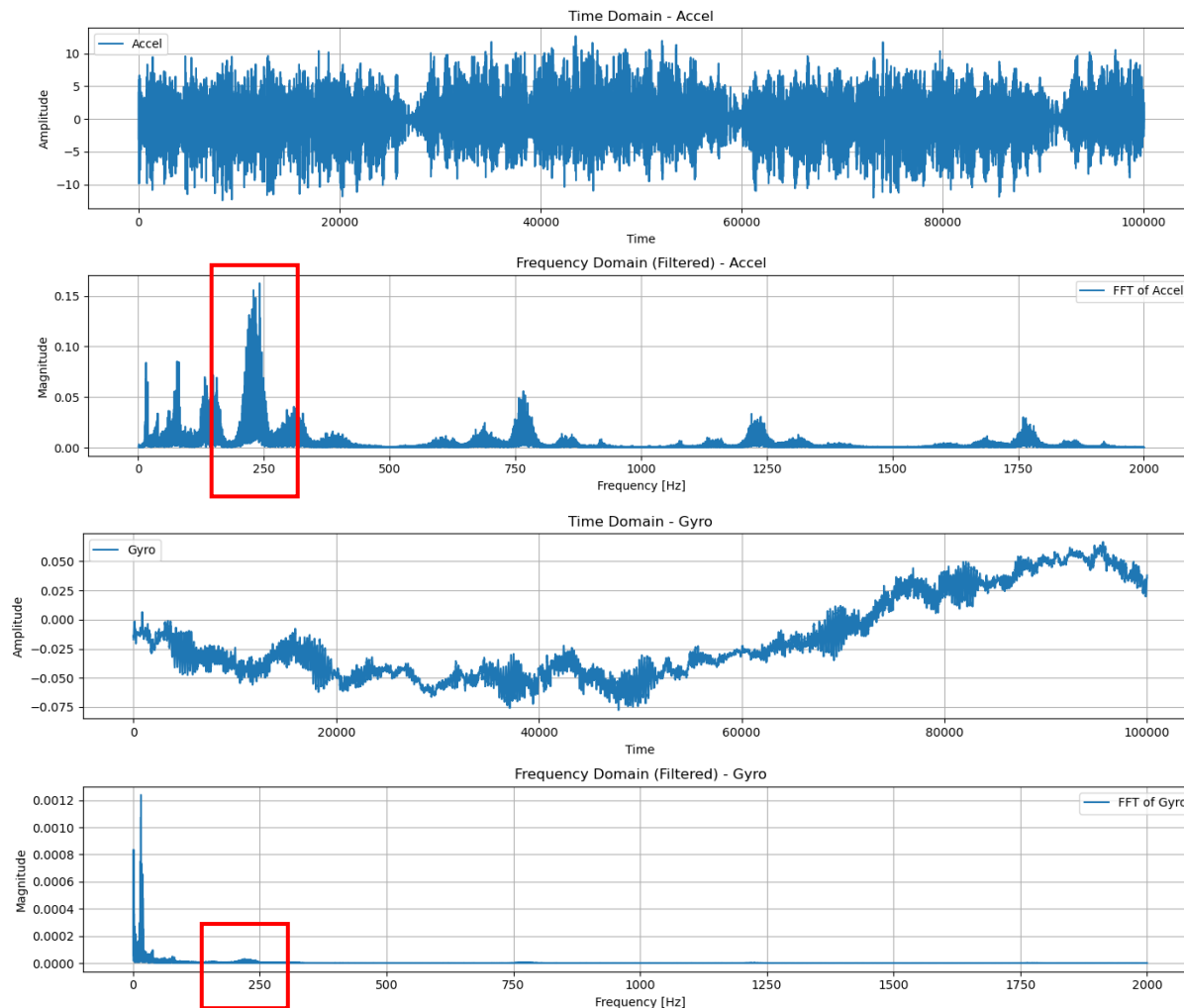
자이로 센서는 모든 주파수 대역에서 가속도 센서에 비해 노이즈가 작지만 특히 30Hz 이상 대역에서 거의 0에 수렴

offset이 지속적으로 바뀌는 경향이 보임

공통적으로 20Hz 부근의 노이즈가 큼
실험 환경에 있는 컴퓨터에 의한 노이즈로 예상됨

03 센서 데이터 분석

센서 정지 상태에서의 Roll 각도



전체적으로 노이즈가 증가하였지만
특히 230Hz 부분에서 노이즈가
증가하였음
스텝모터의 노이즈로 예상됨

가속도 센서는 자이로 센서에 비해
노이즈가 매우 큼

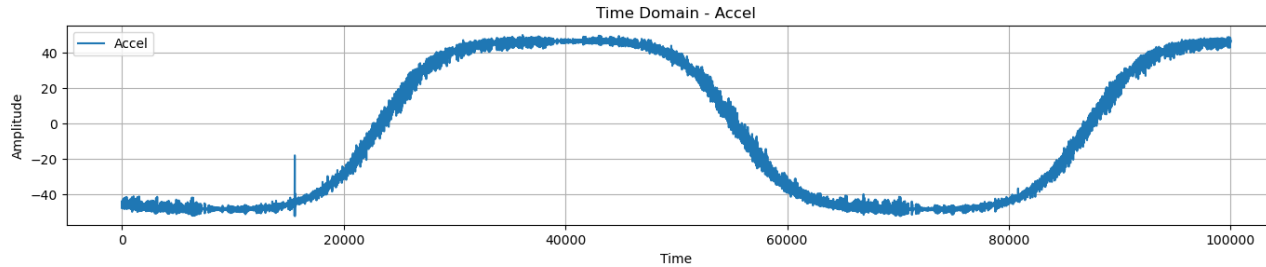
평균 -0.00265로 0에 가깝게 유지함

자이로 센서는 0에 가까운 주파수
영역 이외에는 거의 0에 가까운 크
기를 보이며 노이즈가 작음

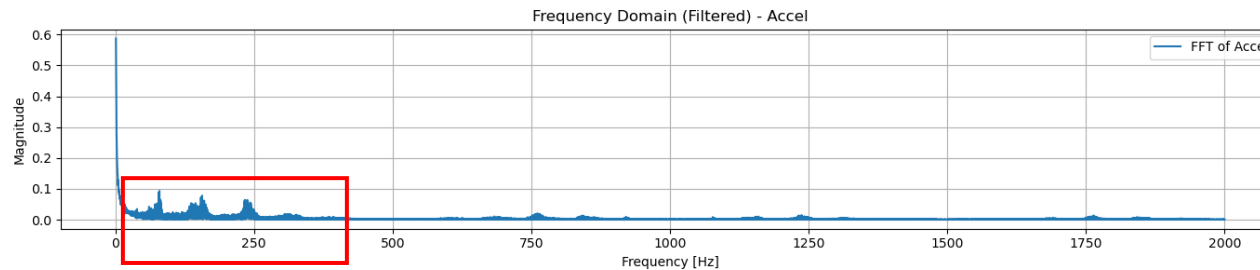
하지만 시간에 따라 위치가 지속적
으로 바뀜

03 센서 데이터 분석

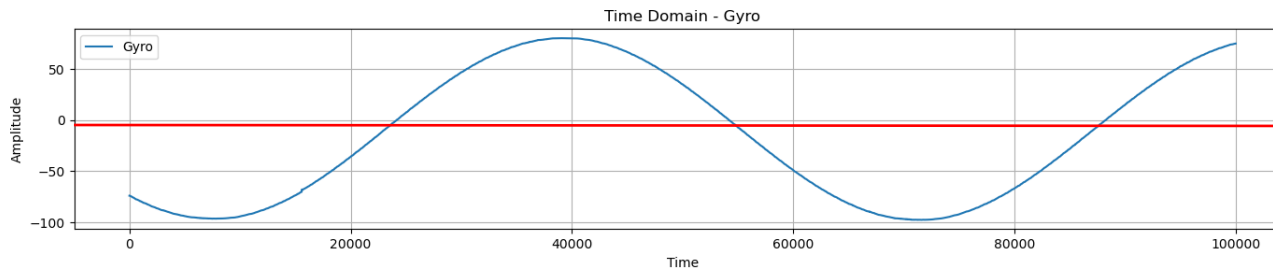
센서 회전 상태에서의 Accel Roll 각도



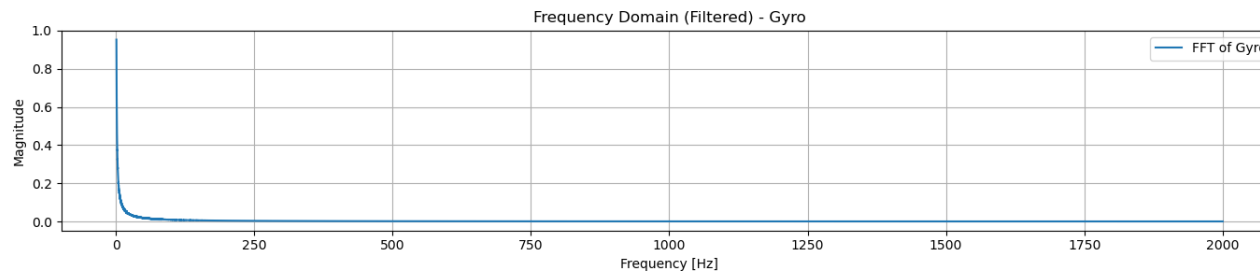
입력의 파형과 측정된 파형이 다른
arctan연산에 의한 영향으로 예상됨



0.0625Hz의 sin파형 입력에 의해
0 근처에서 크게 증가하며,
250Hz 이하에서 노이즈가 많이 생김



자이로 센서로 측정된 각도는
-방향으로 offset이 있음이 확인됨



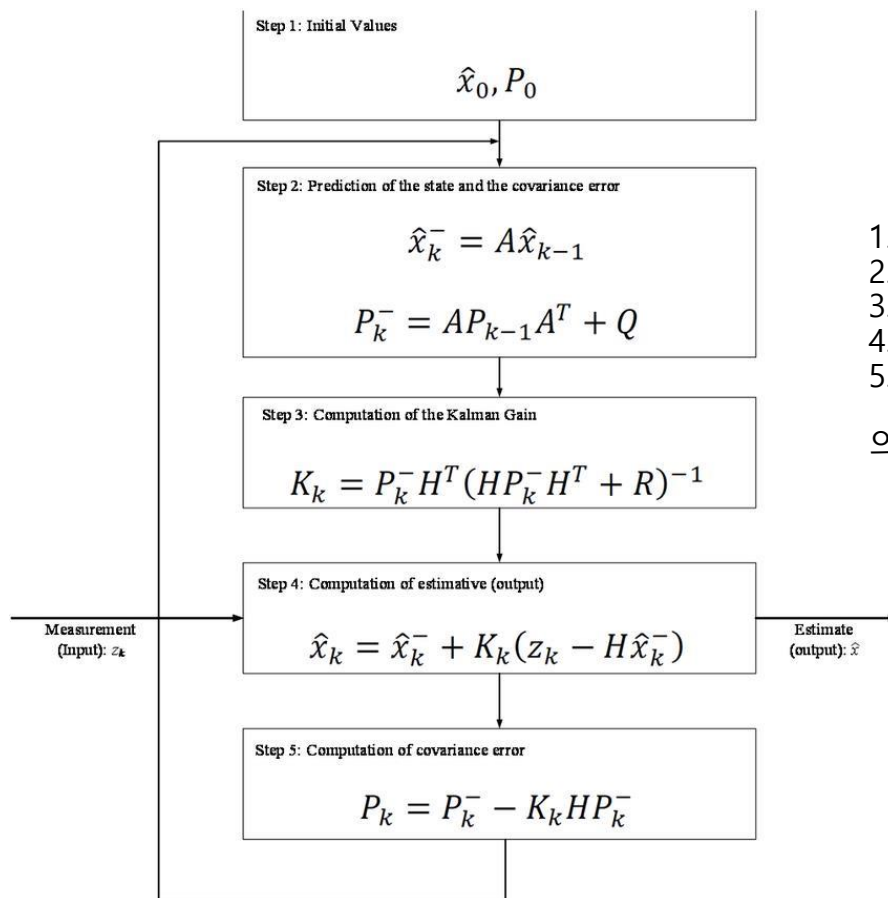
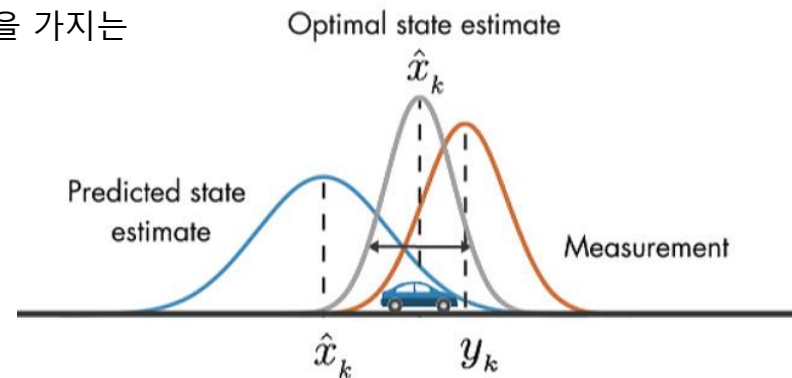
따라서 두 센서를 퓨전하여 노이즈와
offset을 개선할 필요가 있음

04 선형 칼만 필터

04 선형 칼만 필터

모델로부터 추측된 정보와 센서를 통해 측정된 정보를 통해 실제 정보를 추정

선형 칼만 필터에서는 추측된 정보, 측정된 정보가 각각의 분산² 을 가지는 가우시안 분포를 따름을 가정



1. 초기값 선정
2. 추정값과 오차 공분산 예측
3. 칼만 이득 계산
4. 추정값 계산
5. 오차 공분산 계산

의 과정을 통해 추정값의 정확도를 향상 시킴

| 목적 | 변수 |
|---------------|--------------------------------|
| 외부 입력 | z_k |
| 최종 출력 | \hat{x}_k |
| 시스템 모델 | A, H, Q, R |
| 예측값 및 기타 파라미터 | $\hat{x}_k^-, P_k^-, P_k, K_k$ |

04 선형 칼만 필터

센서데이터 적용

시스템 모델링

시스템 $A = 1$

시스템 잡음 공분산 $Q = (4 \cdot t)^2$

측정 잡음 공분산 $R = 9$

출력행렬 $H = 1$

이전 측정 결과 자이로 센서는 각도의 변화를 빠르게 추적가능하지만
오프셋이 계속 바뀜.

따라서 다음과 같이 선정

상태 추정 : 자이로 센서

측정 : 가속도 센서

```
void MPU9250::kalman_1d(float KalmanState, float KalmanUncertainty,
float KalmanInput, float KalmanMeasurement, float deltaTime)
/*
kalmanState : 이전 추정값
KalmanUncertainty : 오차공분산
kalmanInput : 시스템의 변화량
kalmanMaesurement : 측정값
*/

float A = 1*1; // 시스템 행렬
float Q = pow(4*deltaTime,2); // 시스템 잡음 공분산 (측정된 주기가 길어지면 오차가 증가)
float H = 1*1; // 출력 행렬, 측정값과 상태변수의 관계
float R = 3*3; // 측정 잡음 공분산

KalmanState = KalmanState + deltaTime * KalmanInput; // calculate gyro to predict angle
KalmanUncertainty = (A * KalmanUncertainty * A) + Q;

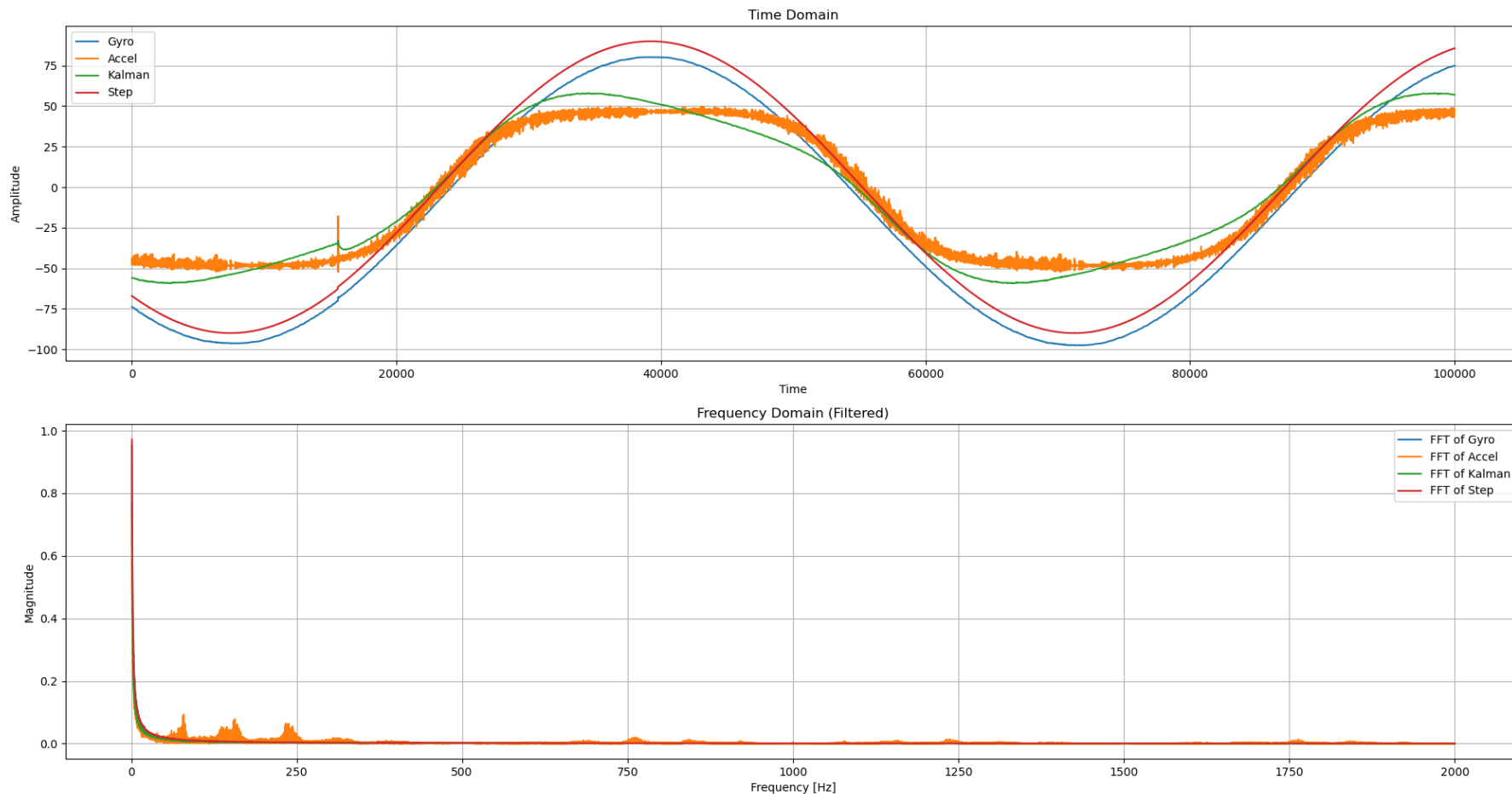
float KalmanGain = KalmanUncertainty * H / (H * KalmanUncertainty + R);

KalmanState = KalmanState + KalmanGain * (KalmanMeasurement - H * KalmanState);
KalmanUncertainty = (1 - KalmanGain) * KalmanUncertainty * H;

Kalman1DOutput[0] = KalmanState;
Kalman1DOutput[1] = KalmanUncertainty;
```

04 선형 칼만

모터 동작 상태에서의 Pitch각도



-25도 ~ 25도 영역에서는 입력과 매우 유사한 측정 결과를 보이며 노이즈와 offset error가 개선됨

05 센서 캘리브레이션

05 센서 캘리브레이션

센서는 데이터는 오차가 존재

오차 요인 :

| | | |
|-------|--------|--|
| 정적 오차 | offset | - 생산 공정상의 오차로 인한 센서 오차 |
| | bias | |
| 동적 오차 | offset | <ul style="list-style-type: none"> - 센서의 가속도, 속도에 따른 변화 - 온도 - 전원 전압 변화 - 외부 노이즈 |
| | bias | |

동적 오차의 경우 동적 오차의 발생원인을 측정 가능해야 보정이 가능이 예상

생산 공정상으로 발생하는 정적 오차를 개선하여 성능을 검증해보고자 함

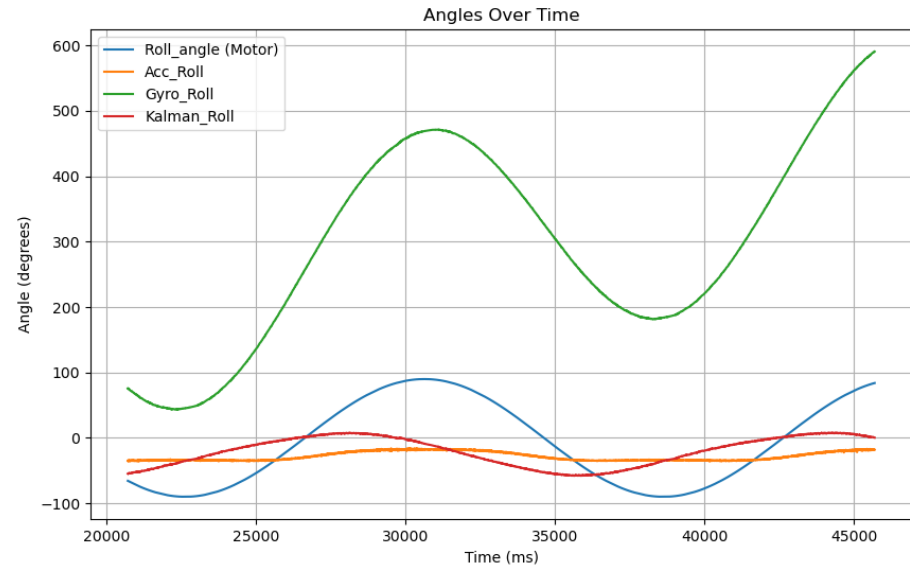
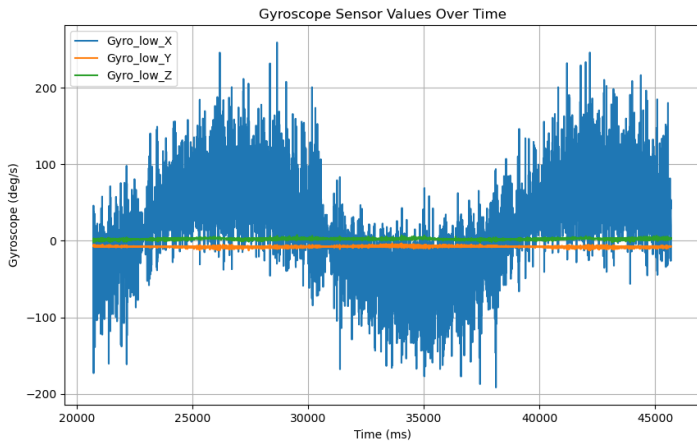
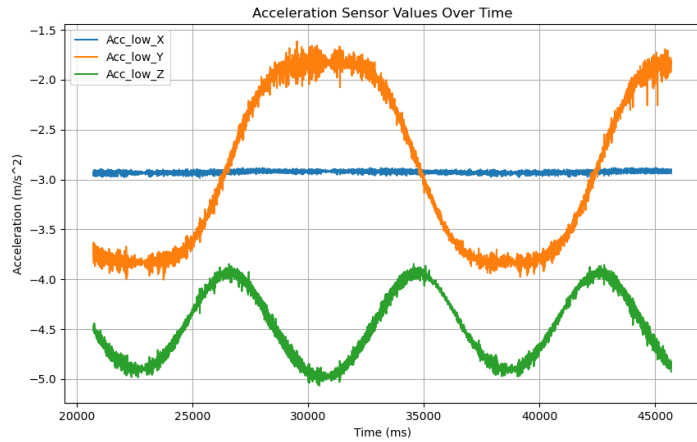
05 센서 캘리브레이션

캘리브레이션 과정

1. 가속도 센서와 자이로 센서의 offset 보정
 - 정적 상황에서의 평균값으로 보정
2. 가속도 센서의 scale 보정
 - 정적 상황에서의 차이값으로 보정
3. 자이로 센서의 scale 보정
 - 선형 회전시 변화량을 측정하여 보정
4. 가속도 센서로 계산한 Euler값의 offset보정
 - 정적 상황에서의 평균값으로 보정
5. 가속도 센서로 계산한 Euler값의 scale보정
 - 정적 상황에서의 차이값으로 보정

05 센서 캘리브레이션

캘리브레이션 전



가속도 센서를 이용한 데이터 :
크기와 위상이 실제와 다름

자이로 센서를 이용한 데이터 :
위상은 실제와 같지만 크기가 크며, 발산

05 센서 캘리브레이션

가속도 센서 offset 캘리브레이션

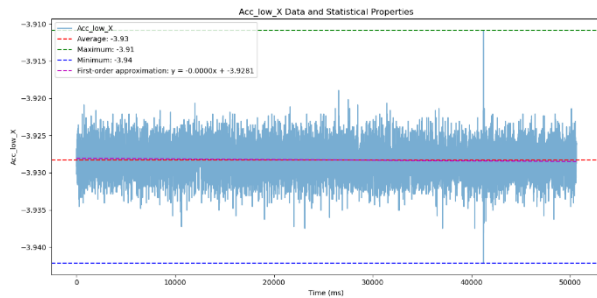
Imu 센서의 6개축을 위로 가도록 돌려가며 데이터 측정

| X- | Y- | Z- |
|--|---|---|
| $Rx1=0$ $Ry1= \text{atan2}(-gz, -gx)$ $Rz1=-\text{atan2}(-gy, -gx)$ | $Ry3=0$ $Rz3= \text{atan2}(-gx, -gy)$ $Rx3=-\text{atan2}(-gz, -gy)$ | $Rz5=0$ $Rx5= \text{atan2}(-gy, -gz)$ $Ry5=-\text{atan2}(-gx, -gz)$ |
| X+ | Y+ | Z+ |
| $Rx2=0$ $Ry2= \text{atan2}(gz, gx)$ $Rz2=-\text{atan2}(gy, gx)$ | $Ry4=0$ $Rz4= \text{atan2}(gx, gy)$ $Rx4=-\text{atan2}(gz, gy)$ | $Rz6=0$ $Rx6= \text{atan2}(gy, gz)$ $Ry6=-\text{atan2}(gx, gz)$ |
| $Rx = (Rx1+Rx2+Rx3+Rx4+Rx5+Rx6) / 4$ $Ry = (Ry1+Ry2+Ry3+Ry4+Ry5+Ry6) / 4$ $Rz = (Rz1+Rz2+Rz3+Rz4+Rz5+Rz6) / 4$ | | |

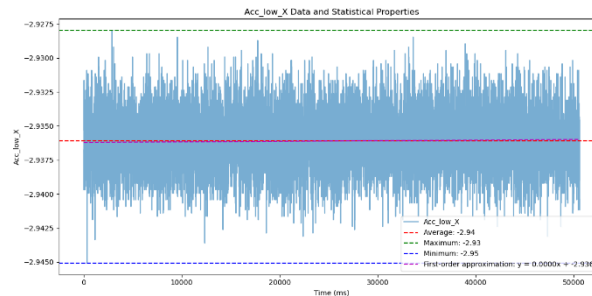
05 센서 캘리브레이션

가속도 센서 offset 캘리브레이션

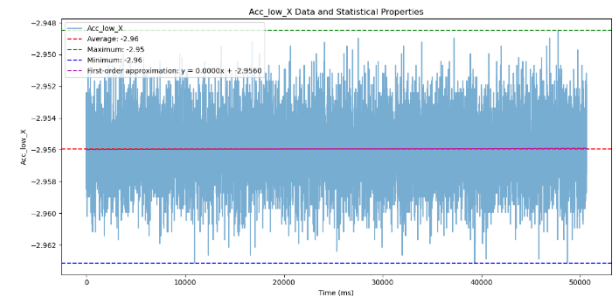
가속도 센서 x축



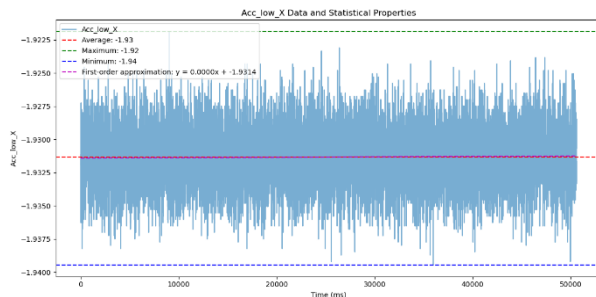
x- : -3.93



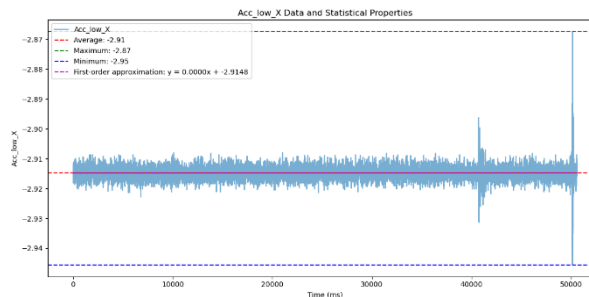
y- : -2.94



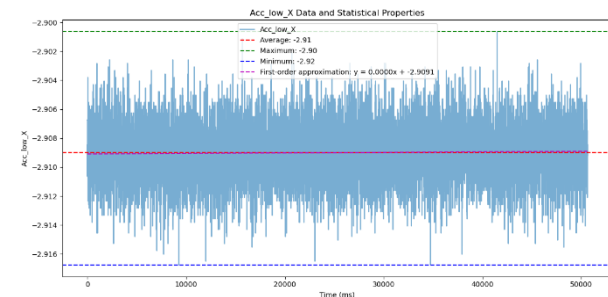
z- : -2.06



x+ : -1.93



y+ : -2.91



z+ : -2.91

가속도 센서 offset :

Acc_x_offset = -2.93

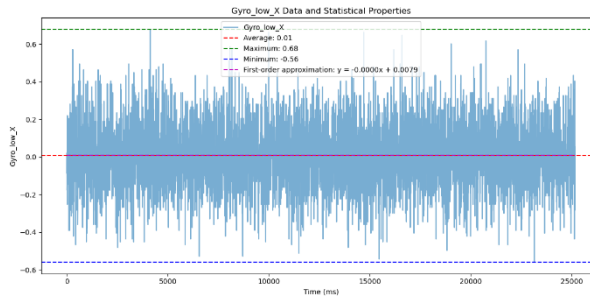
Acc_y_offset = -2.83

Acc_z_offset = -4.94

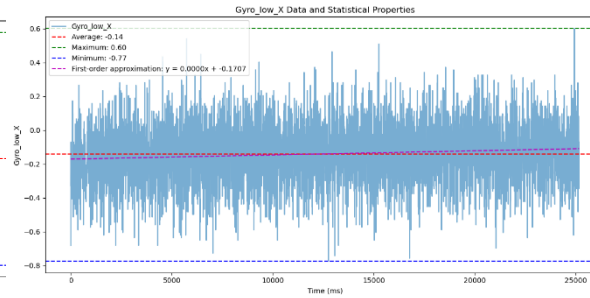
05 센서 캘리브레이션

자이로 센서 offset 캘리브레이션

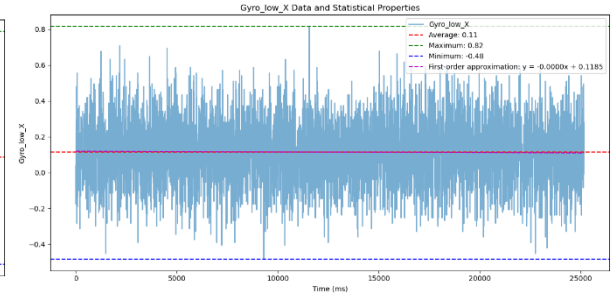
자이로 센서 x축



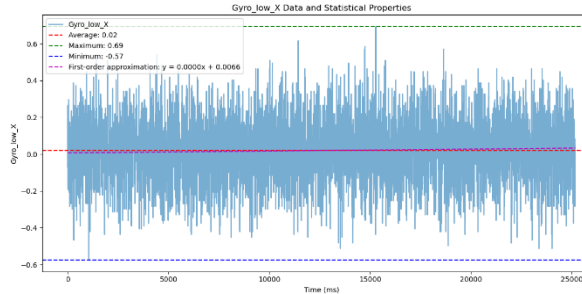
x- : 0.01



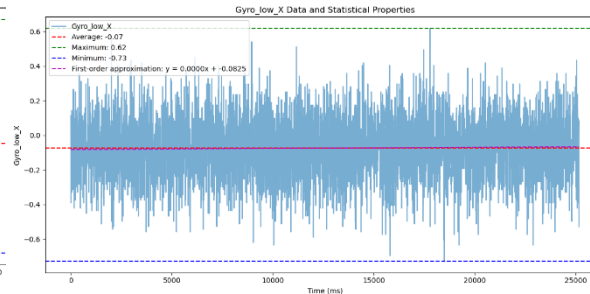
y- : -0.14



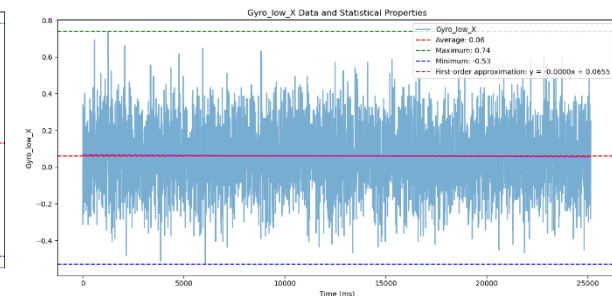
z- : 0.11



x+ : 0.02



y+ : -0.07



z+ : 0.06

자이로 센서 offset :

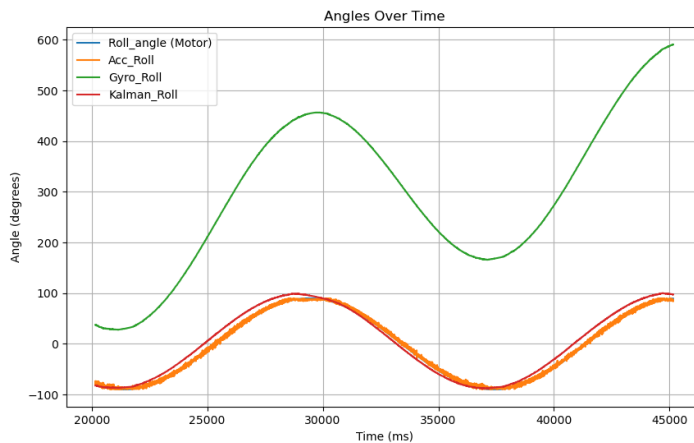
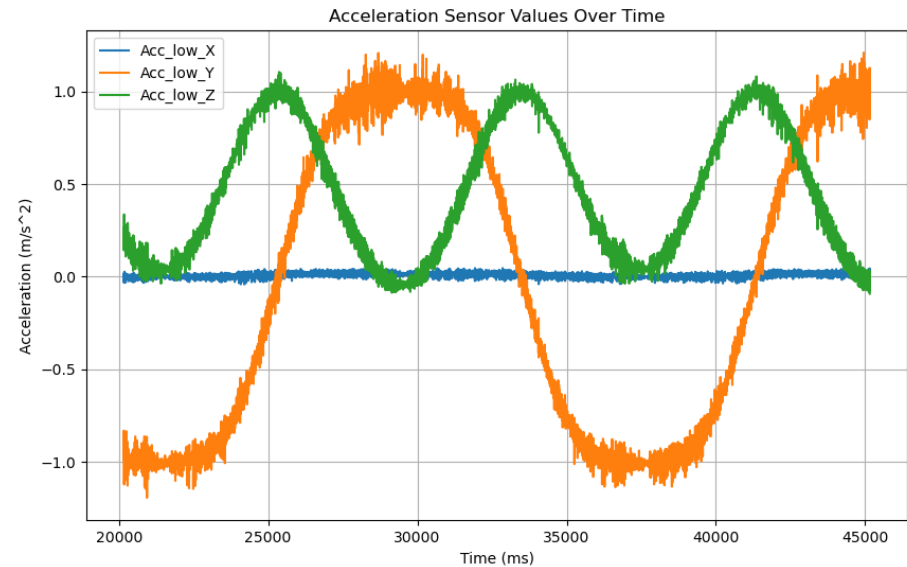
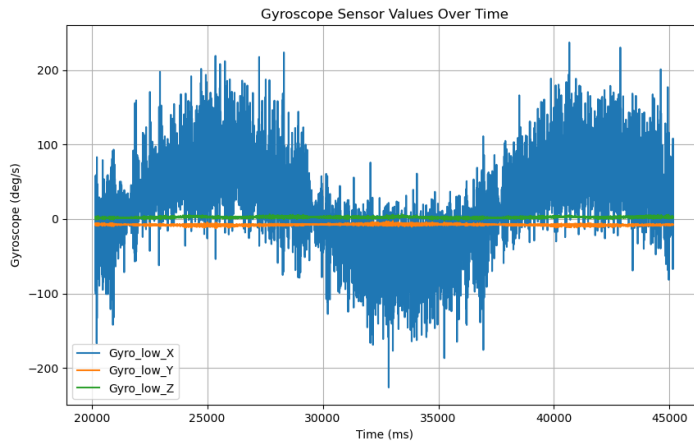
Gyro_x_offset = 7.46

Gyro_y_offset = -7.37

Gyro_z_offset = 4.89

05 센서 캘리브레이션

가속도 센서 offset 캘리브레이션



가속도 센서를 이용한 데이터 :
크기와 위상이 실제와 유사해짐

05 센서 캘리브레이션

가속도 센서 scale 캘리브레이션

Offset을 적용한 상태에서 0도, 90도, 180도, 270도 상태에서의 데이터 수집

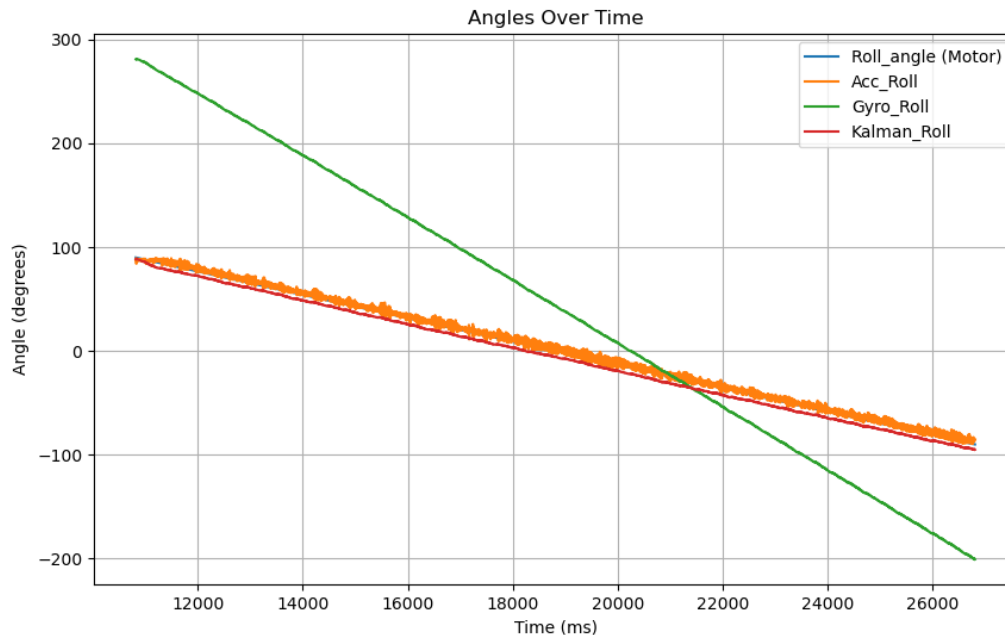
| | 0 | 90 | 180 | 270 |
|---|----------|----------|----------|----------|
| AccX | 0.00953 | 0.0138 | 0.00228 | -0.00265 |
| AccY | 0.000360 | 0.999 | -0.00278 | -1.004 |
| AccZ | 1.007 | -0.00199 | -1.018 | 0.00665 |
| $\text{AccY_scale} = (0.999 - (-1.004)) / 2 = 0.998$ $\text{AccZ_scale} = (1.007 - (-1.018)) / 2 = 0.987$ | | | | |

$$\text{AccY} = (\text{AccY_low} - \text{Acc_y_offset}) * \text{AccY_scale}$$

$$\text{AccZ} = (\text{AccZ_low} - \text{Acc_z_offset}) * \text{AccZ_scale}$$

05 센서 캘리브레이션

자이로 센서 scale 캘리브레이션



모터를 등속으로 회전하고 각도를 측정

자이로 센서를 통하여 구한 각도는
실제 보다 큰 폭으로 변함

각 각도값을 1차 근사를 통해 근사화

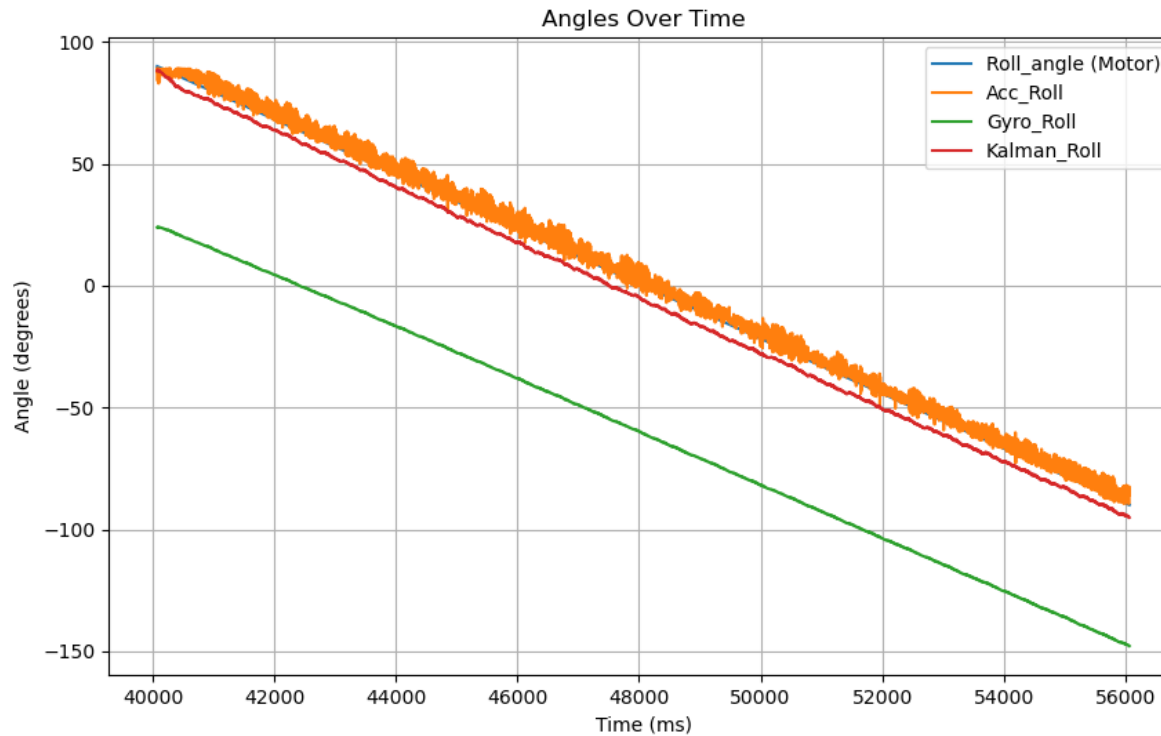
| | | |
|---|------------|--------------------------|
| 1 | Roll_angle | $Y = 0.0113 * x - 239.7$ |
| | Acc_Roll | $Y = 0.0113 * x - 238.8$ |
| | Gyro_Roll | $Y = 0.0335 * x - 670.9$ |
| 2 | Roll_angle | $Y = 0.0113 * x - 211.6$ |
| | Acc_Roll | $Y = 0.0112 * x - 208.9$ |
| | Gyro_Roll | $Y = 0.0303 * x - 526.6$ |

$$\text{GyroX_scale} = 0.3354$$

$$\text{GyroX} = (\text{GyroX_low} - \text{Gyro_x_offset}) * \text{GyroX_scale}$$

05 센서 캘리브레이션

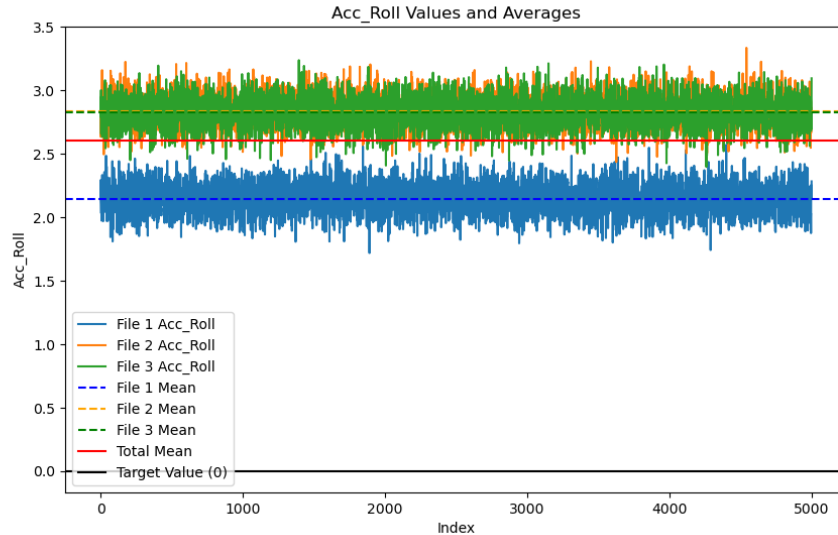
자이로 센서 scale 캘리브레이션



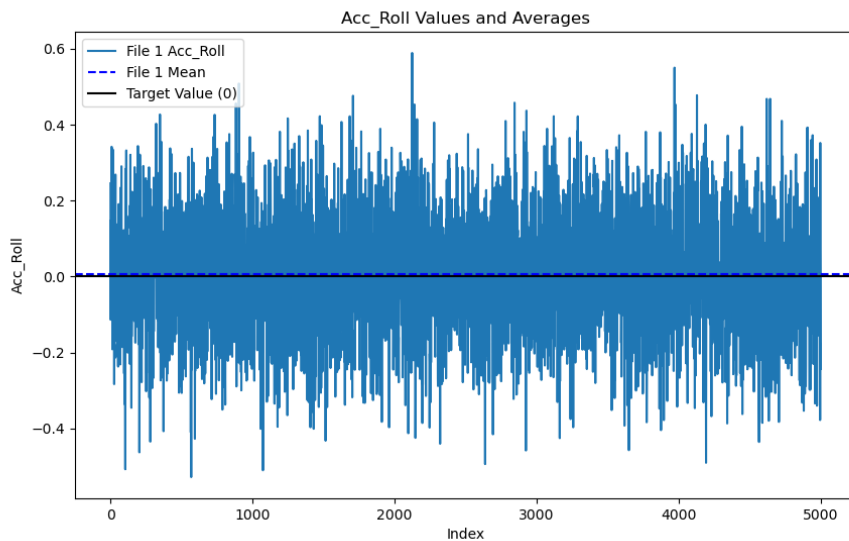
실제 변화와 유사하게 각도 변화

05 센서 캘리브레이션

가속도 센서 Euler offset 캘리브레이션

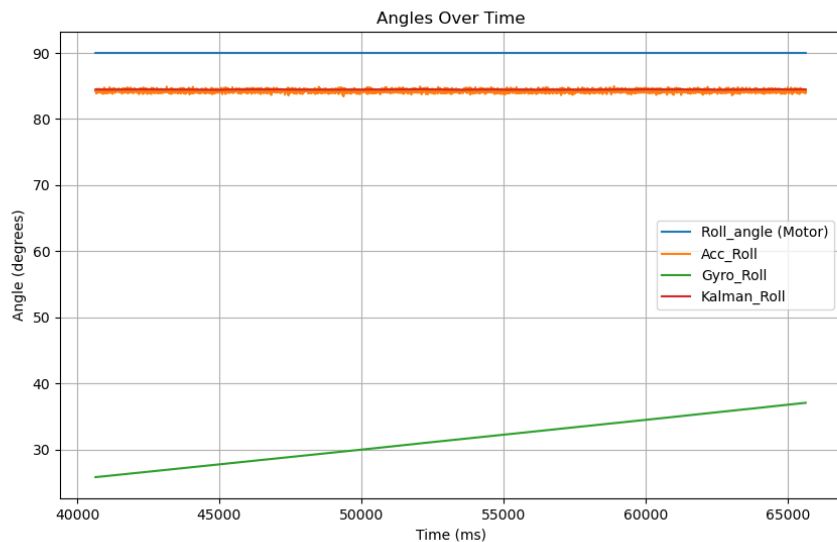


가속도 센서 Euler각을 3회 측정
 $\text{Acc_Euler_Roll_offset} = 2.793$



$\text{Acc_Euler_Roll_Mean} = 0.00606$

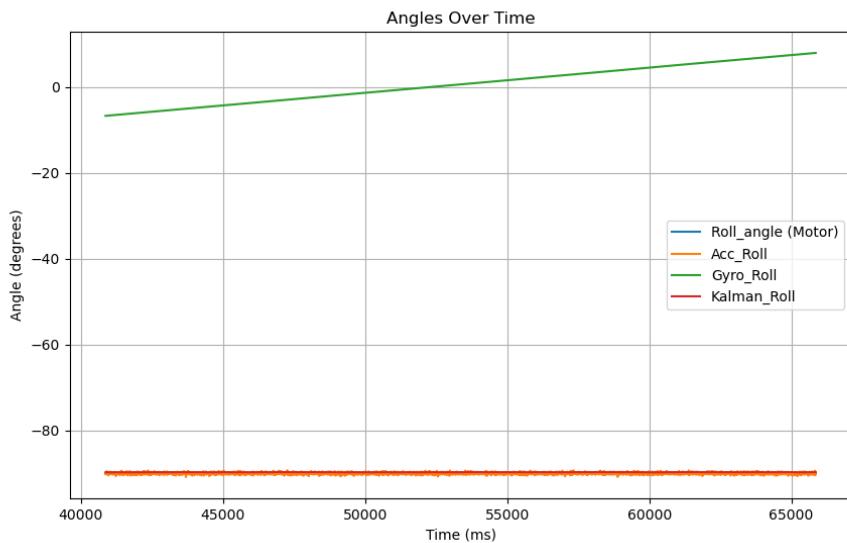
05 센서 캘리브레이션



가속도 센서 Euler scale 캘리브레이션

90도에서 84.268도로 측정

$$\text{Acc_Euler_Roll_scale+} = 90/84.268$$

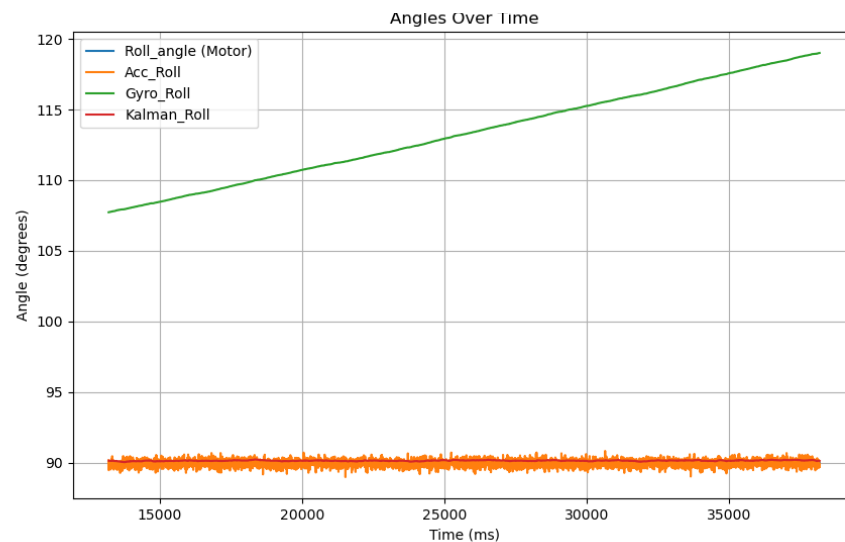
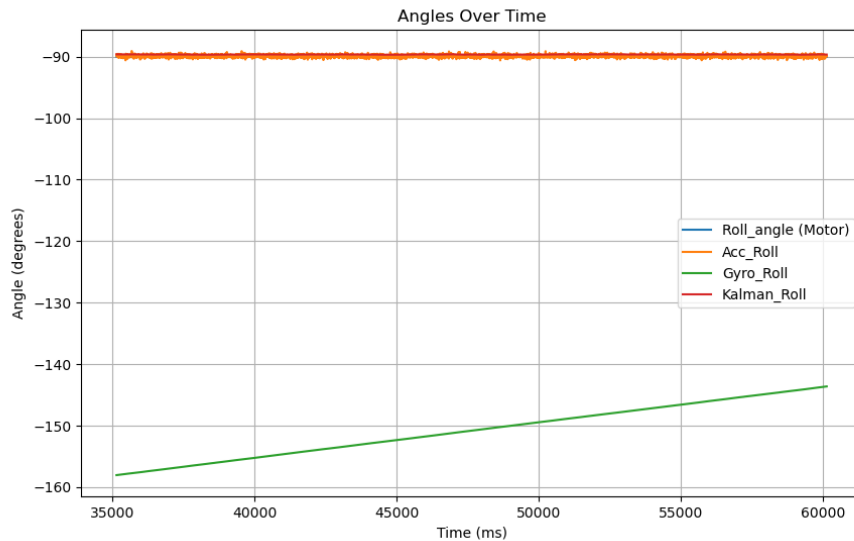


-90도에서 -89.925도로 측정

$$\text{Acc_Euler_Roll_scale-} = -90/-89.925$$

05 센서 캘리브레이션

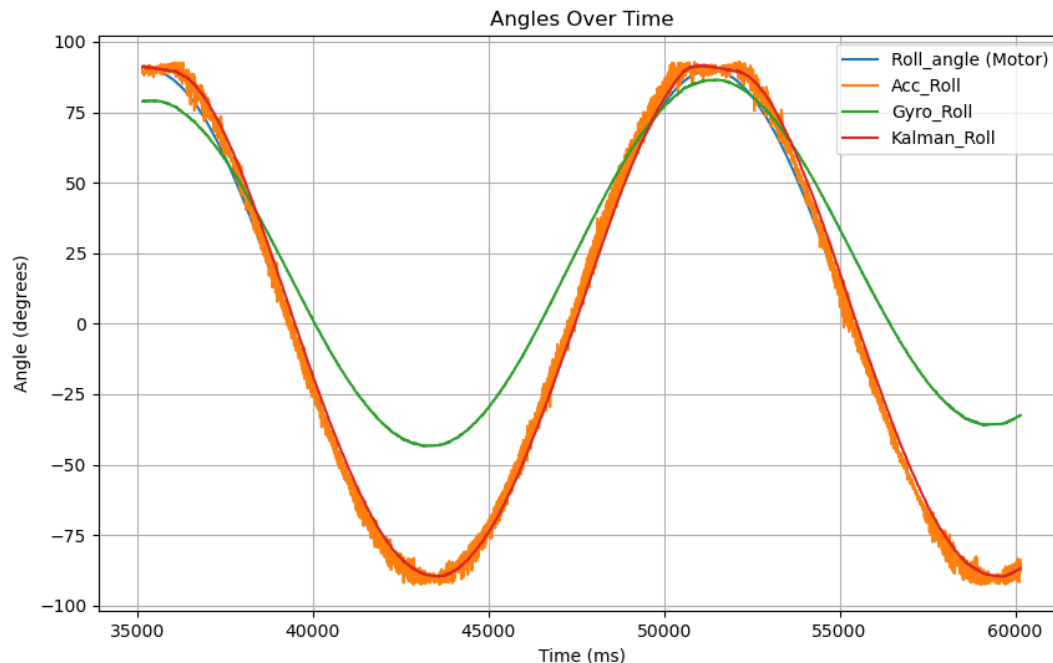
가속도 센서 Euler scale 캘리브레이션



90도에서의 측정 각도와 -90도에서의 측정각도가 실제와 유사해짐

05 센서 캘리브레이션

캘리브레이션 결과



가속도 센서 Euler 각도가 실제 각도에 비해 위상이 늦음

- 실제 모터 동작의 시간차로 예상

자이로 센서 Euler 각도가 오프셋과 크기 차이 발생

- 자이로 센서를 특정 선형속도에서 보정하였지만 속도가 바뀌는 경우 scale이 바뀌는 것으로 예상됨

Kalman Filter Euler 각도가 실제 각도에 비해 위상이 늦음

- 실제 모터 동작의 시간차, 필터에 의한 위상지연으로 예상

06 결론

06 센서 캘리브레이션

캘리브레이션 결과

결론

IMU 센서의 캘리브레이션을 통해 센서 데이터를 보정할 수 있음.

가속도 센서와 자이로 센서를 통해 IMU센서의 기울기를 측정할 수 있음.

가속도 센서를 통한 각도는 낮은 주파수에서는 정확한 각도를 측정 가능하지만 고주파 노이즈 존재

자이로 센서를 통한 각도는 높은 주파수에서 변화를 정확히 측정하지만 저주파 노이즈 존재

KalmanFilter를 통해 가속도 센서와 자이로 센서를 퓨전하여 실제와 거의 유사한 변화를 측정 가능

보완사항

자이로 센서의 scale 보정은 회전 속도에 따라 달라지므로 모델의 입력 속도에 따라 scale 보정을 할 경우 성능이 향상될 것이 기대됨

KalmanFilter에 사용되는 노이즈 공분산에 대한 보정이 필요

감사합니다



한국공학대학교